

doi:10.3799/dqkx.2012.118

覆盖区矿产综合预测思路与方法

成秋明^{1,2}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 围绕覆盖区矿产综合预测的基本思路 and 关键方法问题, 讨论了非线性矿产预测理论和方法如何在覆盖区矿产综合预测中发挥作用, 重点介绍了成矿奇异性理论与非线性矿产预测方法在覆盖区矿产预测“弱信息”提取、“复合叠加信息”分解、“缺失和不完整信息”融合等关键问题中的应用. 结合正在实施的中国地质调查局“覆盖区矿产综合预测”计划项目, 介绍了三方面的研究进展: (1) 覆盖层中地球化学元素迁移机理与覆盖层对地表地球化学异常的屏蔽和衰减作用; (2) 如何识别由于覆盖层影响而造成的“弱”且“复杂”的地球化学异常; (3) 如何综合具有缺失或不完整的多元勘查信息以达到提高覆盖区矿产综合预测精度、降低预测不确定性的目的. 以东天山戈壁沙漠覆盖区海相火山岩型铁矿、大兴安岭南部草原覆盖区铁多金属矿、武夷山层控矽卡岩型铁矿等矿床预测为例, 介绍了综合预测方法的应用过程和应用效果. 研究表明, 奇异性理论和分析方法可以有效地用于提取水系沉积物地球化学和地球物理(重、磁)弱异常, 合理分解复合叠加异常, 在此基础上, 采用地球化学和地球物理异常的数据融合技术, 分别建立了推断铁镁质火山岩、中酸性侵入岩、矽卡岩和热液蚀变等成矿或控矿地质要素的综合信息模型, 以及基于综合预测要素建立的覆盖区矿产预测后验概率证据权模型和模糊逻辑模型. 应用结果显示, 介绍的预测方法不仅可以在出露区圈定成矿远景区, 而且在戈壁沙漠覆盖区及第三、第四系松散沉积物覆盖区等均可圈出具有重要资源潜力的远景区, 这些远景区往往会被传统的预测方法所遗漏.

关键词: 覆盖区; 矿产勘查; 地理信息系统(GIS); 非线性方法; 地球化学异常; 成矿预测; 矽卡岩型矿床.

中图分类号: P624.6

文章编号: 1000—2383(2012)06—1109—17

收稿日期: 2012—10—22

Ideas and Methods for Mineral Resources Integrated Prediction in Covered Areas

CHENG Qiu-ming^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In this paper, it is shown that the element concentration in the stream sediments in the covered areas can be very low due to decay and mask effects even if a thin layer of overburden exists. The examples introduced in the paper for prediction of mineral deposits of skarn types have demonstrated that the nonlinear singularity and generalized self-similarity theories and methods can be used to map anomalies for locating undiscovered mineral deposits in areas covered by transported regolith. Three main aspects of difficulties facing mineral exploration and mineral deposit prediction in covered areas are discussed in the paper which include weak anomalies detection and recognition, decomposition of complex and mixing anomalies due to multiple geo-processes, and application of evidential layers with missing or incomplete information due to covers. Various models have been proposed for prediction of various objects including felsic intrusions, skarn and hydrothermal alterations and local geo-chemical anomalies. Several datasets, including 1 : 200 000 scale geological maps, stream sediment geochemical data, aeromagnetic and gravity data were applied for delineation of potential target areas for Fe mineral deposits of volcanic skarn and hydrothermal types in the areas covered by desert and Tertiary to Quaternary sediments.

基金资助: “覆盖区矿产综合预测”计划项目(No. 1212011085468); 国土资源部公益性行业科研专项(No. 201211022); 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助(No. MSFGPMR201203).

作者简介: 成秋明(1960—), 男, 教授, 博士生导师, “千人计划”国家特聘专家, 曾获国家杰出青年基金、国际数学地球科学协会最高奖——克伦宾奖章, 主要从事矿产勘查、数学地质、地理信息系统的教学和研究.

E-mail: qiuming@cug.edu.cn

Key words: covered areas; mineral exploration; geographic information system; nonlinear method; geochemical anomaly; ore prospecting; skarn ore deposits.

0 引言

奇异性成矿地质事件造成的矿床分布与一定地质异常互为因果相互对应,地质异常表现为与周围地质背景具有一定的成份、结构、构造、成因等方面的差异,因此识别地质异常已经成为矿产勘查和矿产资源预测的有效途径(赵鹏大,2007)。大量实践证明,采用勘查地球化学、勘查地球物理、遥感地质、数学地质等现代矿产勘查理论和方法技术探测和识别地质异常,进而圈定和评价矿床被实践证明是行之有效的。然而,由于戈壁沙漠、草原植被、冰川冻土、红土黄土等覆盖层对下伏成矿信息的屏蔽和衰减作用,使传统的矿产预测和勘查方法在覆盖区矿产预测中受到很大局限,开展覆盖区矿产有效预测已经成为国际性难题。比如,由于不同类型和性质的覆盖层对深部矿床成矿元素的屏蔽和衰减效应,在地表介质中可以检测的地球化学异常微弱,普通的勘查技术和传统的异常识别原理解释方法很难发挥有效作用,发展适合覆盖区矿产预测的理论方法和技术已经成为当今国际地学前沿问题。

过去十多年来,勘查地球化学家特别关注的问题之一是如何在具有深度风化或者异地运移的覆盖层地区开展勘探地球化学工作。最近发表的一系列综述性文章系统地总结了地球化学勘探技术在过去几十年的发展,其研究进展包括反映隐伏矿床引起的地球化学元素扩散新模型、为增强异常的信噪比而研发的取样和分析新技术、以及处理和解释地球化学异常的数学模型和地学信息新技术。比如国际应用地球化学协会前三任主席(Cohen *et al.*, 2010)对国际勘查地球化学领域过去十年来学科发展的总结中提到,地球化学的基本问题之一仍然是研究地球化学异常组成、以及如何通过取样介质的选择和分析方法的创新增强异常、如何使用不同的数学模型和信息技术处理地球化学数据并识别和解释异常。由于覆盖层的影响,在具有深度风化或者异地运移的覆盖层地区开展矿产勘查会遇到诸多困难(Cheng, 2012a),如:(1)弱缓信息获取困难。由于覆盖层的作用,勘查地球物理,尤其是勘查地球化学技术所能提取的直接或者间接找矿信息往往为弱缓信息,识别这些信息对于研究地质过程和预测隐伏地质体(包括矿体)均有重要意义;(2)复合叠加信息的

分解和识别困难。在地球表面测量或者通过航空和卫星遥感技术获得的地球物理和地球化学信息往往是混合、复合、叠加的信息,造成信息叠加的原因不仅有多重地质过程(包括成矿地质过程)的叠加作用,同时还与覆盖层的叠加作用有关,分解复合和叠加信息是去粗取精、去伪存真的过程,对覆盖区矿产预测格外重要;(3)找矿信息的缺失和不完整的困难。由于覆盖层的影响带来地质观察的不便,往往会造成覆盖区所能获得的地学信息的缺失和不完整,这样最终必然给综合研究以及矿产勘查带来困难。如何克服以上三方面的困难是开展覆盖区矿产预测的核心研究任务,也极具挑战性(Cheng, 2012a, 2012b)。

本文谈到的覆盖区和覆盖层是针对矿产勘查而言的,由于在不同的研究领域和面对不同研究对象,研究者们可能会对覆盖区和覆盖层给出不同的定义。为了讨论方便,这里笔者将覆盖层定义为:针对某种矿床和矿体而言,发生在该原生矿床和成矿系统(包括原生晕系统)形成之后,覆盖在矿体之上的覆盖物。这里有几点要强调说明:首先,覆盖层是相对某种成矿系统、矿床和矿体而言的;其次,对于一种矿床而言是覆盖层,对于另一种矿床并非总是覆盖层,比如出露地表的沉积矿产,作为沉积矿产本身并不属于覆盖层,但是对埋藏其下的早期形成的内生矿床而言,该地表的沉积矿层可看作覆盖层。强调时间和空间关系是将覆盖层的形成发生限定在原生矿床和成矿系统之后。因此,覆盖层中不会保留原生矿床和矿体的原始信息,包括原生晕信息。因此,在覆盖层中获取和识别与下伏成矿有关信息只能是次生的信息,比如,矿床形成之后经过风化作用形成较厚的风化层,原始岩石中的成矿元素可以发生扩散和富集,形成次生分散晕;再比如,异地搬运而来的覆盖层其原始成分可能与下伏矿床没有成因联系,但由于覆盖层长期处于地表系统中并受到各种地表过程的作用,下伏成矿相关地球化学元素在覆盖层向上迁移,并在地表介质中得到富集并形成地球化学异常。如何在覆盖层中获取反映下伏矿化信息是勘查地球化学的核心任务。

近年来,笔者及其科研团队针对复杂地质条件下矿产资源快速预测和评价开展了研究,在地球化学和地球物理弱信息提取和异常识别、复合和叠加

异常分解以及信息综合与资源统计预测方面进行了探索(Cheng, 2007, 2012a, 2012b). 近三年来, 针对前面提到的覆盖区矿产预测的困难, 进一步探讨了采用非线性矿产预测理论和方法解决矿产预测关键问题的途径(Cheng, 2008a, 2012a, 2012b; 成秋明, 2011). 在覆盖区开展地球化学勘查工作, 人们除了要选择有效的取样介质和分析方法外, 还必须选择合适的数学方法和信息处理技术来分析和解释地球化学异常. 正如遥感工作一样, 除了要研究测量平台、传感器技术、数据获取和保存方式外, 还需研究图像处理和应用技术, 包括信息提取、信息融合、图像分类等技术. 随着地球化学取样和分析技术的提高和成本的降低, 尤其是各种便携式的传感器测量技术(如便携式荧光矿石分析仪)的发展, 使得地球化学的测量可以在不同尺度上覆盖一定面积, 并形成地球化学图像. 再比如, 随着航空和卫星高光谱遥感技术的发展各种地表地球化学数据将被广泛使用, 因此, 地球化学数据的使用也将不再是简单地对样品点含量高低的直接评价, 图像处理技术可以被广泛应用. 地球化学图像提供的空间信息远远比单个样品含量高低的信息丰富得多. 遥感图像处理很少考虑单个像源图像数值的高低, 而更多致力于研究图像的空间信息和图斑信息(Pattern). 因此, 图像处理技术, 包括弱信息挖掘技术、图像分解和分类技术、图像融合技术、建模技术等各种现代信息技术均可运用于地球化学数据处理中. 笔者针对覆盖区矿产预测特点, 探讨了非线性矿产预测的途径, 文中将简要介绍有关方法原理, 并以应用实例说明覆盖区矿产预测的一些关键问题和解决方案.

1 覆盖层对矿产预测的影响

覆盖层对矿产预测的影响可以归纳为两个方面: 一方面, 如果覆盖层厚度和范围都较大, 它的存在必然会影响覆盖区的基础地质填图质量和地质认识水平, 最终影响矿产预测和找矿效果; 另一方面尽管覆盖层的厚度和范围都不是很大, 对较小比例尺的地质填图工作和基础地质认识影响不大, 但是对找矿信息(如地球化学异常信息)的获取仍有较大的影响. 前者的影响是显而易见的, 以下重点谈谈后者的影响.

1.1 成矿元素在覆盖层中的垂向迁移机制与密度分布变化规律

由于覆盖层(如沙漠、植被、土壤等)发生在原

生矿床形成之后, 并覆盖在矿床(体)之上. 一般来讲, 覆盖层中不会保留覆盖层之下的原生矿床的原始信息, 比如蚀变信息和原生晕信息. 然而, 由于覆盖层分布在矿床(体)或者矿化蚀变岩石之上, 并长期受各种地表系统以及物理、化学和生物等作用的影响, 埋藏在覆盖层之下的成矿物质(元素和颗粒)会向上迁移, 在覆盖层中局部富集, 从而在地表介质中形成地球化学异常. 为了真正了解不同地区、不同类型的覆盖层对地球化学元素的屏蔽和衰减作用, 必须深入研究深部成矿物质在盖层中的迁移机制和分布变化规律. 目前, 国内外学者提出了多种关于地球化学元素迁移和地球化学异常形成机制和机理的认识, 但目前还没有一种被广泛接受和普遍适用的理论(Cohen *et al.*, 2010; Mann, 2010). 现有金属成矿元素的迁移扩散机制至少包括: 电化学机制(electrochemistry)(Govett, 1973, 1976; Smee, 1983, 1998)、扩散与对流机制(diffusion-and-convection)(Carrigan *et al.*, 1996; Goldberg, 1998)、蒸发-一流逸-一对流机制(evaporation-transpiration-convection)(Mann *et al.*, 2005)、循环的膨胀性泵吸机制(cyclical dilatancy pumping)(Cameron *et al.*, 2002, 2004)、植被和生物化学机制(vegetation and biochemistry)(Dunn, 2007; Anand and Robertson, 2012)、以及地气中的纳米颗粒迁移机制(nanoparticles in geogasses)(王学求等, 2012; 叶荣等, 2012; 张必敏等, 2012). 以上多数研究是关于成矿物质在覆盖层中的迁移机理的探索, 这些研究表明覆盖层下的成矿物质以多种形式(离子或微粒)向上迁移. 然而, 关于元素迁移的定量研究, 如迁移速率和密度分布等的研究成果则相对较少. Goldberg(1998)报道了前苏联科学家所做的关于覆盖层中元素迁移速度的实验结果, 以及与扩散理论方程的对比研究成果. 他们的研究成果表明, 某些金属元素在覆盖层中的迁移速率比传统浓度扩散方程所估计的速率快很多. 这些研究不仅证明元素存在迁移, 而且开启了用定量方法模拟成矿元素在风化层中的迁移规律的研究领域. Moon(1999)研究了土壤中点源异常与水系沉积物地球化学异常的空间关系. Cameron *et al.* (2004, 2008)系统地研究了智利西部 Spence 隐伏斑岩铜矿地球化学特征, 对比了矿区和远离矿区的地球化学元素在土壤盖层中的分布差异. 通过对地下水微量元素和同位素特征研究, 表明地下水发生过水岩反映, 在此基础上提出了一种新的元素扩散机理和土壤地球化学异常的形成模型.

该模型认为,地表地球化学异常是由地震事件诱造成含金属元素的地下水向上流动,所携带的金属在地表土壤中被土壤吸附形成地表地球化学异常. Wang *et al.* (2007) 系统研究了中国新疆干旱沙漠覆盖区金矿成矿元素在干旱沙漠风化层中的纵向迁移变化特征,结果表明,金及其相关元素在纵向剖面上呈现“C”月牙形的分布,即元素在蚀变岩石与盖层界面附近和近地表的含有机质土壤层趋于富集. 认为近岩石风化面的元素可能来自矿体和含矿地质体,而接近地表的土壤中的元素富集可能与土壤或者土壤表面的氧化层吸附作用有关. Anand and Robertson (2012) 报道了在深度风化或者异地运移的覆盖层中成矿元素的迁移和分散规律的研究成果. 他们选择了 2 个具有完全不同覆盖景观条件的矿床实例研究了元素的垂向迁移特征,特别关注了生物作用在元素迁移扩散中的作用. 除以上元素分散模型和迁移机理的研究外, Carrigan *et al.* (1996) 通过地下爆炸实验模拟了地下核试验可能造成携带放射性元素的天然气体在上覆岩石和构造裂隙中的迁移速率和衰减变化规律,他们采用扩散-对流模型与观测结果进行了对比,结果表明原子数较高且扩散性较差的气体运移速度相对较快. 笔者及其团队对内蒙大兴安岭南部草原覆盖区乌日尼图似斑岩型 W-Mo 矿床和迪彦钦阿木 Mo-Ag 矿床进行了研究,采用便携式荧光矿石分析仪对多个钻孔岩心进行了系统测量,结果表明,随着覆盖层的加厚和离开蚀变岩石风化面距离的增加,成矿元素在覆盖层中的含量总体呈下降趋势,而且服从幂率(分形)分布 (Cheng, 2012c). 这里仅举其中一个实例说明覆盖层中的元素含量密度变化趋势. 图 1 给出了乌日尼图矿区 WRZK520-11 钻孔岩心上段覆盖层中 Zn 元素的测量结果(其他元素的测量结果可参见 Cheng, 2012c). 该钻孔的钻探工作于 2011 年 8—9 月间完

成,孔深 820 m. 钻孔揭露的主要岩性为奥陶系砂板岩,下部出现燕山期细粒花岗岩,该岩体可能是主要的控矿要素. 在地表以下 400 m 左右出现辉钼矿矿体,围绕矿体形成了较强的矿化热液蚀变. 矿化强度与近水平发育的几毫米~几厘米厚的石英脉与石英网脉发育有关. 钻孔上部有大约 10 m 厚的第四系和第三系松散沉积物. 按 20 cm 的采样间距获得 33 组地球化学数据,包括 W, Mo, Fe, Zn, Cu 等 20 余种元素. 从图 1 可以看出,元素含量分布与离开下伏蚀变岩石的距离呈反相关关系,并可用幂率(分形)模型进行拟合,说明覆盖层对元素的迁移变化具有较大屏蔽和衰减作用,这是造成覆盖区深源地球化学异常为弱缓异常的主要原因.

必须指出,由于不同地区覆盖层类型以及覆盖层的成因差异,元素在覆盖层中的迁移机制也会不同,加之元素的物理化学性质差异,必将导致元素在覆盖层中的迁移变化呈多样性,具体以哪种机制为主还需根据具体情况进行细致研究. 笔者给出了以下定量模拟元素迁移变化的一般动力学模型 (Cheng, 2012c).

$$\frac{dC(x)}{dx} = -\frac{1}{\lambda(x)} C^\gamma(x), \quad (1)$$

式中: x 是距离下伏矿化蚀变岩石风化面的距离; $C(x)$ 是覆盖层中的元素密度; $\lambda(x)$ 是衰减系数. 一般来讲,衰减系数的具体形式是未知的,然而,我们可以根据泰勒级数分解定理给出多种简化动力学模型和混合模型,包括高斯模型、指数模型、幂率模型、反距离指数模型 (Cheng, 2008b, 2012c) 分别为:

$$\begin{aligned} C(x) &= [c_1 x^{1-\beta} + c_2]^{1-\gamma}, \beta \neq \text{整数}, \gamma \neq 1, \\ C(x) &= c_1 \exp(-c_2 x^{1-\beta}), \beta \neq \text{整数}, \\ C(x) &= [\lambda_{-1} x^2 + \lambda_0 x + \lambda_1 \log x + \lambda_2 x^{-1} + c_2]^{1-\gamma}, \beta = \text{整数}, \gamma \neq 1, \\ C(x) &= cx^{-\lambda_1} e^{-\lambda_1 x^2} e^{-\lambda_0 x} e^{\lambda^2 \frac{1}{x}}, \beta = \text{整数}, \end{aligned} \quad (2)$$

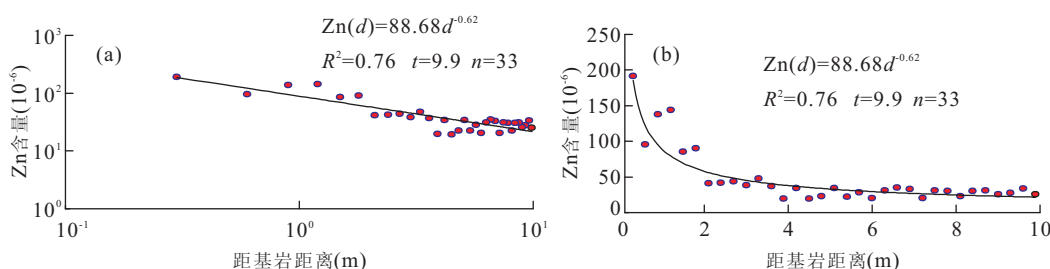


图 1 钻孔岩心上段覆盖层中 Zn 元素含量密度分布趋势

Fig. 1 Plots showing the relations between concentration of Zn and depth from the surface of underlying weathered rocks 样品间隔约 20 cm, 数据采集采用便携式 XRF 仪 (Niton XL3t950); 横坐标为离开下伏蚀变岩石风化面的距离, 纵坐标为元素含量点图表示测量数据; 线条为最小二乘拟合; a. 双对数坐标; b. 原始坐标

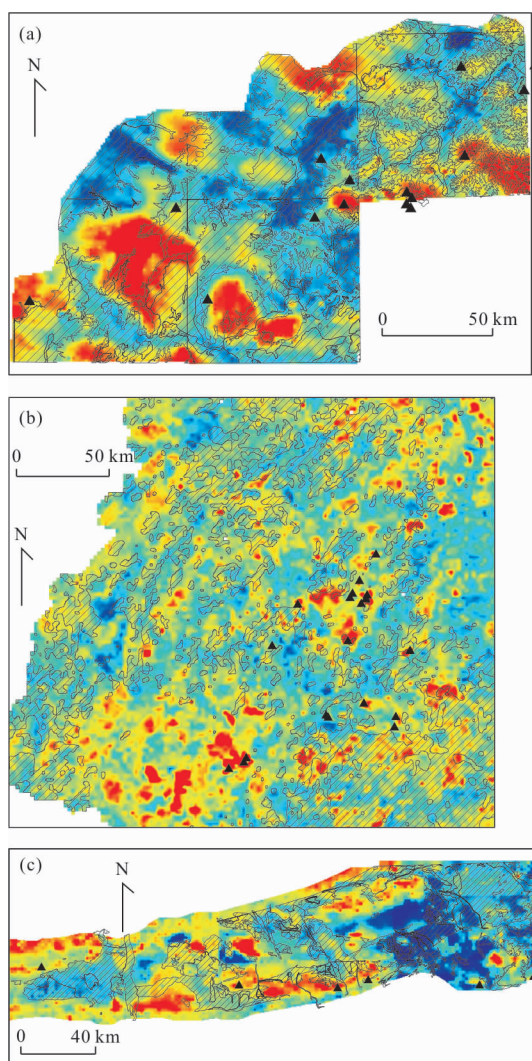


图2 水系沉积物Fe地球化学异常与覆盖层的空间关系

Fig. 2 Distribution of Fe in stream sediment samples

a. 内蒙大兴安岭沙麦一朝不愣地区; b. 福建武夷山某地区; c. 新疆东天山东段某地区. 图中背景颜色代表水系沉积物地球化学元素含量, 暖颜色表示高含量, 冷颜色表示低含量; 斜线多边形图案表示覆盖层分布范围; 图2a中覆盖层为第三系和第四系沉积物覆盖层; 图2b中的覆盖层为植被覆盖层; 图2c中的覆盖层为沙漠覆盖层; 三角形符号表示铁和其他矿床(点)

以上公式为刻画元素迁移规律提供了定量模型(包括混合模型). 混合模型中每种模型所占的权重可以采用最优拟合的方法自动获取. 有关这方面的研究请参看 Cheng (2012c).

1.2 覆盖层对水系沉积物地球化学异常的影响

为了检验覆盖层对水系沉积物地球化学异常识别的影响, 我们绘制了多幅地球化学图, 并对比分析了覆盖区和出露区地球化学异常的空间变化差异. 比如图2中分别显示了内蒙大兴安岭沙麦一朝不愣地区、福建武夷山地区新疆东天山地区某一范围

内的水系沉积物地球化学异常与覆盖层的空间分布关系图. 图2a是内蒙大兴安岭沙麦一朝不愣地区6幅1:25万比例尺地球化学成果图, 面积大约3.2万 km^2 , 共有8000余个水系沉积物地球化学样品, 每个样品代表 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 面积. 该图幅范围区73%的面积被最大厚度达200 m的第三系和第四系松散沉积物所覆盖. 出露的区域主要为中酸性侵入岩和古生代—中生代沉积岩分布. 覆盖层范围在图中用斜线图案表示. 可以看出, 相比全区水系沉积物地球化学异常总体分布, 在有覆盖层分布的区域异常强度(元素含量)呈相对降低趋势, 说明覆盖层对水系沉积物地球化学异常有较大屏蔽或衰减影响. 对以上差异的更详细的定量对比和统计检验研究还需进一步开展. 在地球化学数据处理和异常分析与解释上要充分考虑覆盖层的影响并采取有效方法消除覆盖层的影响, 从而有效利用地球化学数据. 类似地, 图2b和2c分别给出了福建武夷山地区、新疆东天山地区水系沉积物地球化学异常与植被覆盖层、沙漠覆盖层的空间分布关系. 可以看出, 由于受到覆盖层的显著影响, 覆盖区比露头区的水系沉积物地球化学异常相对较弱和较低.

2 覆盖区矿产预测理论与方法

覆盖区矿产综合预测除了要遵循一般矿产综合预测的基本原理和工作流程外, 还需考虑覆盖区矿产综合预测的特殊性. 这里将简要介绍矿产综合预测的一般流程以及覆盖区矿产预测的特殊方法. 图3给出了非线性矿产预测的理论和一般方法流程示意图(成秋明, 2008c). 以下将通过应用实例来简要说明图3中表示的主要内容.

2.1 矿床模型与找矿标志

在成矿地质背景和成矿规律研究基础上建立的成矿模型在矿产预测中发挥着重要的指导作用. 矿床模型的核心研究内容是矿床成因与成矿机理, 在此基础上确定控矿要素, 并指导找矿模型的建立和找矿标志的确定. 成矿模型与找矿模型的不同在于成矿模型比较注重矿床普适性特征的研究及共性规律的总结, 侧重理论研究, 而找矿模型的研究除要了解成矿模型的基本内容外, 更注重找矿标志的研究和标志获取方法的研究. 以矽卡岩型铁矿为例, 成矿模型主要回答矿床的成因类型是否属于矽卡岩型矿床, 以及矿床的形成时间, 成矿物质来源, 运移与富集条件等, 这些特征的研究对于确定矽卡岩型矿床

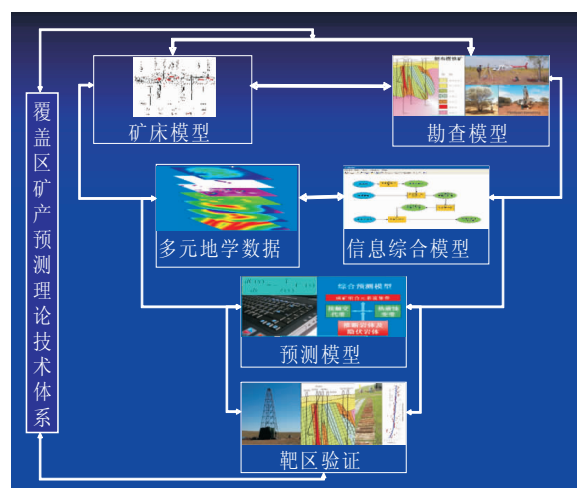


图 3 覆盖区矿产综合预测理论和方法体系流程

Fig. 3 Flowchart showing the processes of integrated prediction of mineral deposits in covered areas

的找矿方向,重要控矿要素和找矿标志等都具有重要的指导意义。但是,在没有发现矽卡岩型矿床之前,如何通过适当的勘查手段和方法(如地球物理、地球化学等)获取勘查信息,并在此基础上判断什么位置上(包括三维预测深度)会有什么类型和规模的矿床和矿体产出,这些是找矿模型的核心研究内容。矿床模型和找矿模型的关系与医学领域医学病理和医学诊断的关系相似,对某种疾病的病理研究目的是了解该种疾病是如何形成的,有什么共同性质?然而,如何采用现有的医学测试分析技术(物理方法、化学方法、生物方法等)获得病人的症状信息,从而判断该病人是否携带该种疾病。因此,作为大夫或者找矿人必须了解病理和病症,同时必须了解医疗器械的功能和对测试所获得的信息进行合理解释和病情的诊断。因此,病理学的基础研究和诊断方法和技术的应用研究必须同步进行,两个方面的共同提高才能最终提高对疑难病症的有效诊断和治疗,也将促进医学理论和技术的研究。矿产资源的研究也同样需要加强矿床机理基础研究和找矿方法的应用基础同步研究,这两者既有区别又密切联系,并相互促进。

找矿模型的核心内容是要回答:采用何种勘探方法?获取何种找矿信息?如何利用找矿信息?从而达到对矿床进行最优识别和最佳预测的目的。预测信息与矿床分布和矿床质量相关,必须通过一定的探测手段和技术获取预测信息,因此,预测信息的获得方法要具备可操作性和预测性。勘查技术应用的前提是地质体之间的差异性。比如,地球物理探测

和地球化学探测方法是通过测量地质体之间的物理性质和化学性质的差异来识别正常地质体与成矿地质体。

以下将以矽卡岩型铁矿为矿床预测类型(陈毓川和王登红,2010)介绍矿床模型和找矿模型的建立。矽卡岩型矿床是铁矿资源的重要来源之一。在内蒙古大兴安岭地区、新疆天山地区、福建武夷山地区矽卡岩型铁矿床均属于重要矿床类型。矽卡岩型矿床主要是由中酸性岩浆岩(少数由变质岩)与碳酸盐类岩石的接触交代作用形成的一类矿床,矽卡岩是该类矿床的重要标志。矿床的成因和时空分布都与矽卡岩密切相关(Einaudi and Burt, 1982)。由于矽卡岩是由一套接触交代蚀变岩石组成,其矿物成分不仅与岩浆岩和碳酸盐类等原始岩石组成有关,还与成岩物理、化学、生物条件有关,如果岩浆热液主要交代碳酸盐类将形成钙矽卡岩,形成的常见矿物组合包括石榴子石、辉石等含钙硅酸盐矿物;若主要交代含镁碳酸岩(如白云质灰岩或白云岩)形成镁矽卡岩,矿物组合包括橄榄石和透辉石等含镁矽卡岩矿物。许多情况下,不同的成岩过程叠加形成复杂矽卡岩,如早期形成的较高温度的矽卡岩(如石榴子石、辉石),被晚期热液交代形成含水硅酸盐矿物(如阳起石、透闪石、绿帘石和绿泥石等)(邓松涛等,2006)。矽卡岩型铁矿以磁铁矿为主,与矽卡岩具有时空关联性,矿体往往赋存于矽卡岩带内,受矽卡岩的影响铁矿体结构构造往往呈不规则状,受到沉积岩岩相界面、层间构造和其他界面的控矿,也可形成层状、似层状、透镜状矿体。

根据前人的研究成果表明朝不楞铁矿床、雅满苏铁矿床、马坑铁矿床均与矽卡岩有成因联系,马坑铁矿和朝不楞铁矿为矽卡岩型铁矿床(赵一鸣等,1983;刘建明等,2004;金岩等,2005;邵积东等,2009),而雅满苏铁矿床属于海相火山岩型铁矿,受后期岩浆改造形成矽卡岩,铁矿体与矽卡岩的时空关系密切(刘德权等,1996;王登红等,2006;陈毓川和王登红,2010)(图4)。从找矿角度,矽卡岩是找矿的重要标志,与矽卡岩型矿床具有类似的特征,因此将这三类矿床进行对比分析,通过成矿模式的基础研究可以得出下列找矿标志组合:

(1)成矿有利构造环境:马坑铁矿和雅满苏铁矿均分布在晚古生代坳陷或裂陷带中,区域性断裂发育并控制岩浆活动;

(2)有利围岩条件:马坑铁矿与石炭一二叠纪浅海相白云质碳酸盐围岩密切,雅满苏铁矿与早石炭

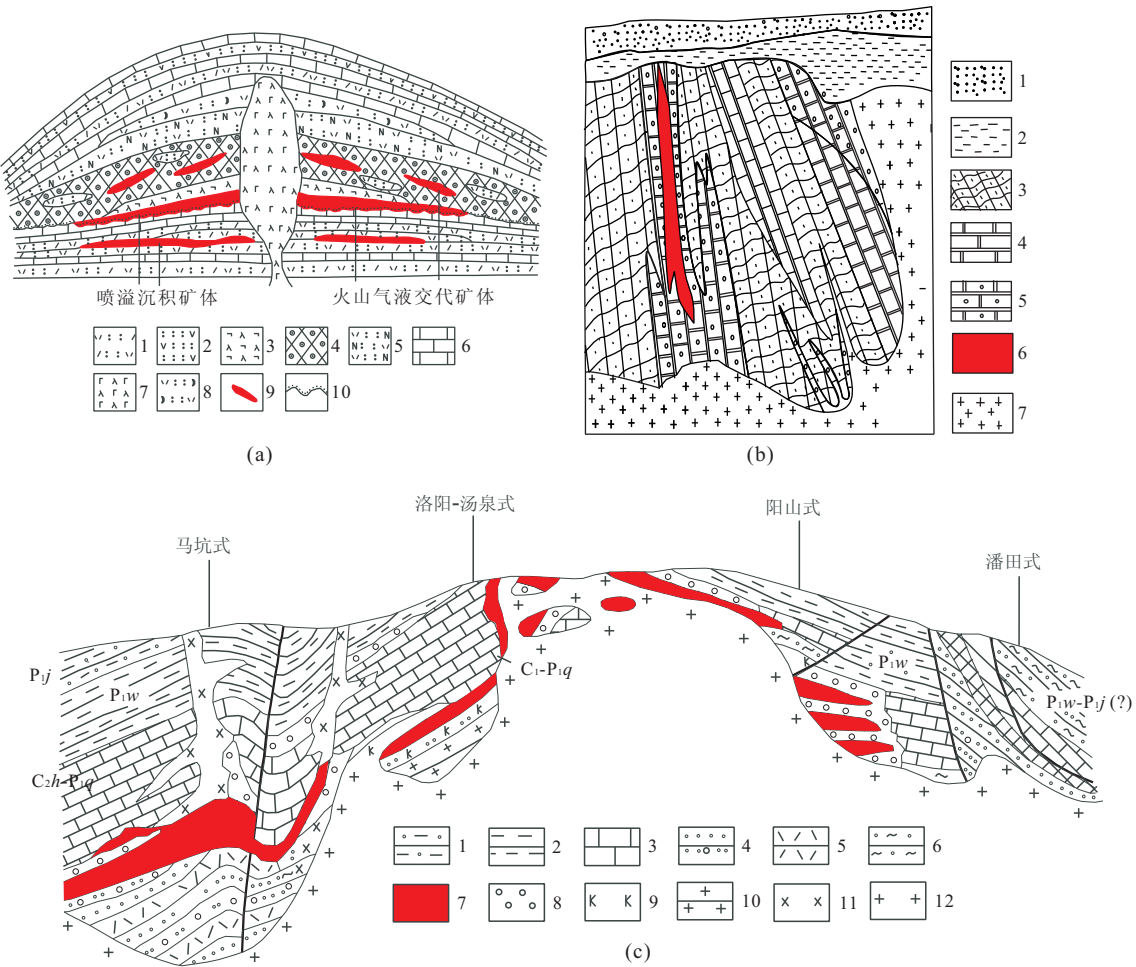


图 4 矿床成因模型

Fig. 4 Mineral deposits models

a. 哈密市雅满苏式铁矿床成因模式图 (刘德权等, 1996 年); b. 大兴安岭地区朝不楞砂卡岩型铁多金属矿床成矿模式示意图 (从勘探剖面改编); c. 福建武夷山马坑层控砂卡岩型铁矿的典型矿床成因模式图 (赵一鸣等, 1983)。图 4a 中, 1. 纹质质晶屑凝灰岩; 2. 安山质沉凝灰岩; 3. 钾细碧岩; 4. 石榴石砂卡岩 (含凝灰岩残留体); 5. 流纹质凝灰岩 (钠长石化); 6. 灰岩; 7. 破火山口充填的次玄武岩; 8. 流纹质玻屑凝灰岩; 9. 铁矿体; 10. 火山喷发不整合面 (线)。图 4b 中, 1. 第四系沙土; 2. 第三系红土; 3. 角岩; 4. 大理岩; 5. 砂卡岩; 6. 铁矿体; 7. 花岗岩。图 4c 中, 1. 粉砂岩和细砂岩; 2. 泥质板岩; 3. 结晶灰岩和大理岩; 4. 编制石英砂 (砾) 岩、石英岩; 5. 变凝灰岩或灰质粉砂岩; 6. 片理化变质粉砂岩; 7. 磁铁矿体; 8. 砂卡岩; 9. 钾化; 10. 花岗质混合岩化; 11. 辉绿闪长岩; 12. 花岗岩类

世富碱的双峰式玄武质—流纹质火山岩系关系密切, 这些围岩具有化学性质活泼、孔隙度大的特征, 便于气液活动和水岩反应;

(3) 有利构造条件: 马坑铁矿主要与褶皱构造、推覆滑脱构造、层间破碎带、侵入接触带等构造系统密切相关, 雅满苏铁矿的有利产出部位为古火山机构中心附近的火山喷发不整合面;

(4) 岩浆条件: 马坑铁矿主要与燕山期中浅成侵入岩 (闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩) 或其斑岩类有关, 雅满苏铁矿与早石炭世双峰式火山岩系关系密切, 并受华力西晚期岩浆侵入作用的叠加与改造;

(5) 矿体结构与构造: 马坑式铁矿矿体主要以似

层状、透镜状产出, 与推覆—滑脱构造面产状基本一致, 雅满苏铁矿体以脉状、层状、似层状、透镜状为主, 与围岩产状基本一致, 此外, 受后期岩浆热液叠加改造, 矿体有团块状等不规则形状;

(6) 矿石矿物: 马坑铁矿矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿组合, 黄铜矿、闪锌矿、方铅矿组合, 以及磁铁矿等, 雅满苏式铁矿金属矿物主要为磁铁矿, 次为假象赤铁矿、赤铁矿、黄铁矿等;

(7) 围岩蚀变: 除了各自的差异外, 马坑铁矿和雅满苏铁矿均有砂卡岩化、碳酸盐化、绿帘石化、绿泥石化等围岩蚀变;

(8) 微量元素组合: Cu、Ag、Mn、Pb、Zn 等异常;

(9) 该类矿体均以磁铁矿为主要矿石矿物, 一般具有剩余磁性, 较大的矿体或者矿化体均产生磁异常, 但由于具有剩余磁性, 磁异常的形态与矿体的产状和方向有关;

(10) 由于矽卡岩矿物的一般密度均在 3.3t/m^3 以上, 与正常岩浆岩和沉积岩密度相比较, 如果矽卡岩带较大或者矿体和矿化体较大可以形成局部高重力异常。

2.2 找矿模型与预测模型

从成矿模型、到找矿模型、再到预测模型的建立过程, 是由概念模型、向逻辑模型、再向数学模型的转化过程, 也是由定性模型向定量模型的转换过程, 预测模型须具备可操作性、预测性和有效性。从成矿模型建立到预测模型的转换, 是开展矿产资源预测的基本内容, 包括“三步式”矿产预测方法 (Singer, 1993) 和以 GIS 为基础的信息综合方法 (Agterberg, 1989; Bonham-Carter, 1994) 等, 这些方法都需要在矿床模型的基础上建立预测模型。预测模型可以在 GIS 环境下建立和实现。如何将定性的找矿标志模型化和定量化, 构建意义明确、内涵丰富、满足定量化预测所需要的信息图层, 是将地质概念模型与预测模型有机关联的关键。根据具体预测目标, 需对各种找矿标志 (或预测变量) 进行筛选、优化、组合, 形成一套最优预测要素 (找矿标志) 组合。为了帮助表达和实施建模过程, 笔者曾提出采用 GIS 建模器技术 (model builder) (成秋明等, 2009)。建模过程需要具备建立地质模型的基础知识和定量建模技术, 尤其是开展大范围的矿产资源预测工作, 需要地质人员、建模人员和 GIS 操作人员紧密协作。ArcGIS 和 GeoDAS 软件提供了建模器技术 (Cheng *et al.*, 2000), 该技术以框图的形式和逻辑语言来表达建模过程, 是地质人员、建模人员、GIS 操作人员、甚至管理人员都能理解和使用的技术。模型的检验、运行、实施则由 GIS 自动实现。它为地质人员、建模人员、GIS 操作人员、甚至管理人员搭建了统一而便利的对话平台, 并实现了模型建立、模型运行、自动实施的有机结合与统一 (成秋明等, 2009)。建立模型的基本程序是: (1) 确定地质目标并建立地质概念模型; (2) 选择和确定合理的模型类型; (3) 确定模型的输入和输出; (4) 确定建立模型的参数; (5) 确定模型的运行和实施条件。以下以矽卡岩型铁矿为例说明模型的建立过程和建模器的应用。

2.2.1 岩体推断模型 为了在大兴安岭地区、东天山地区和武夷山地区开展矽卡岩型铁矿床预测, 相关

岩浆岩的识别和推断是缩小预测目标, 圈定预测远景区的重要途径。比如, 东天山地区分布有一系列从古生代到中生代形成的火山岩、火山沉积岩和侵入岩。受早古生代和中生代南北板块的俯冲作用, 形成了区域性近东西走向分布的构造系统 (王赐银和马瑞士, 1994)。这些东西向断裂和褶皱控制了研究区的主要地质构造分布模式, 并与北北西和北东方向的构造叠加控制了岩浆活动以及火山岩与侵入岩的空间展布, 同时也控制了与岩浆岩有关的矿床 (包括矽卡岩型矿床) 的空间分布。早石炭系发生的海底火山喷溢和火山沉积作用对形成火山喷溢和火山沉积型铁矿床扮演了重要的角色。后期二叠系岩浆侵入以及相关的热液作用对早期形成的铁矿床进行了改造和富集 (马瑞士等, 1997; 陈岳龙, 1999)。后期岩浆作用和岩浆期后热液的形成不仅为铁矿成矿系统注入了进一步富集所需的能量, 促进铁矿化的进一步富集, 同时由于岩浆与碳质火山岩的接触交代形成丰富的矽卡岩和矽卡岩型矿床。侵入体周围也形成了大范围的矽卡岩带、热液蚀变带以及矿化原生晕带, 这些均为矽卡岩型矿床的预测提供了间接标志。然而, 由于该研究区三分之一以上的面积被戈壁沙漠覆盖, 因此, 对岩体 (包括隐伏岩体) 的推断以及对火山岩和火山机构的推断是本研究区开展矽卡岩型铁矿预测的重要任务。

由于岩浆岩与其他类型的沉积岩和变质岩具有矿物、岩石和地球化学的显著差异, 因此可以利用地球物理和地球化学勘探方法对岩浆岩 (包括火山岩和侵入岩) 进行识别和圈定。酸性岩浆岩一般具有高酸性元素组合含量, 如 K_2O , Na_2O , SiO_2 , Al_2O_3 , 而基性岩浆岩具有高基性元素组合含量, 如 MgO , Fe_2O_3 , MnO , CaO 等。酸性岩浆岩与沉积岩或变质岩相比具有密度低的特征, 因此酸性侵入岩和火山岩与沉积岩等围岩相比往往呈低重力异常。此外酸性岩浆岩与沉积岩和变质岩相比还具有弱磁性, 而基性岩浆岩具有相对强磁性, 因此, 可以采用常量元素组合和重、磁地球物理综合异常推断酸性和基性侵入岩和火山岩。图 5 给出了推断中酸性岩体的地球物理和地球化学综合模型。为了有效消除覆盖层的影响, 利用地球物理和地球化学数据推断岩体, 必须对地球物理和地球化学数据进行适当的数据处理、图像处理和信息分析。图 5a~5c 给出了对地球物理和地球化学数据预处理和综合的逻辑模型。预处理的主要目的是为了获取与研究对象有关的地球物理和地球化学信息, 尤其是消除或压制覆盖层的影响, 提取弱信息和分解复合叠加信息。图 6 给出了

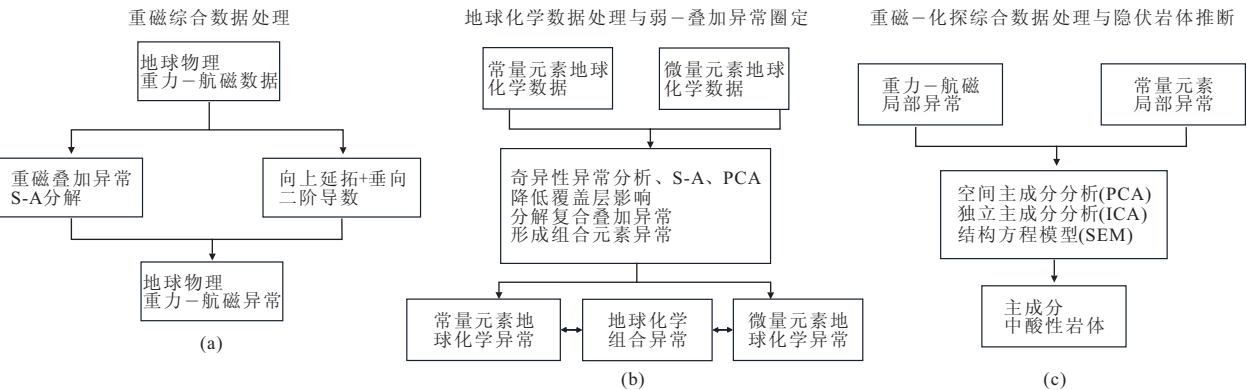


图 5 数据处理与中酸性岩体预测模型和方法流程

Fig. 5 Flowchart showing the processes of geophysical and geochemical data preprocessing and integrated prediction model for locating felsic igneous rocks associated with skarn mineral deposits

a. 地球物理数据处理模型和流程; b. 地球化学数据处理模型和流程; c. 中酸性岩体预测推断地球物理和地球化学综合模型

采用弱信息提取技术和多元信息融合技术推断酸性岩体的结果. 图 6a、6c 和 6d 分别给出了东天山、大兴安岭和武夷山某地区酸性岩体的预测和推断结果. 在应用主成分分析方法建立地球物理和地球化学融合模型之前, 首先采用了图 5a 中介绍的高通滤波技术对地球物理重力和航磁数据进行了预处理, 采用图 5b 中介绍的奇异性弱信息提取技术对原始地球化学数据进行了预处理. 在此基础上, 采用图 5c 中的模型进行了主成分分析, 得到了反映岩体的变量组合为: 具有正载荷的酸性元素组合(如 K_2O , Na_2O , SiO_2 , Al_2O_3)和具有负载荷的基性元素组合(如 MgO , Fe_2O_3 , MnO , CaO), 此外还具有低重力异常, 磁异常载荷相对较小, 说明磁异常对岩体的识别能力较弱. 图 6b、6d 和 6e 分别给出了 3 个研究区的岩体的分布范围主成分得分图, 图中具有较高得分的分布范围与酸性岩体空间吻合度较高, 反映了主成分分析结果对酸性岩体具有较好的预测性. 为了对比预测结果与地质填图的岩体实际结果, 图中用格子图案叠加了已知酸性岩体. 结果表明, 已知岩体出露范围与预测岩体的分布范围具有较高的空间相关性, 表明岩体预测模型与实际情况的吻合度较高. 此外, 本研究团队对东天山地区岩体预测结果的统计检验结果也说明了这一点 (Zhao *et al.*, 2012).

2.2.2 接触交代和热液蚀变带的推断模型 矿化蚀变带是寻找热液型矿床的重要找矿标志, 矽卡岩带的存在为矽卡岩型矿床的寻找提供了重要标志. 由于矽卡岩的特殊形成环境和特殊矿物岩石组成, 矽卡岩带具有明确的识别和勘查标志, 尤其是具有磁铁矿化的蚀变带, 可以采用地球物理和地球化学

综合探测的方法进行识别, 比如图 7 中给出的模型可以用于矽卡岩带和其他热液蚀变带的识别和圈定: 岩浆岩(侵入岩或者火山岩)分布边缘, 大比例尺地球化学和地球物理数据所圈定的局部重力高异常、局部航磁异常、地球化学基性元素组合、以及相关的微量元素组合异常. 地球化学元素组合的确定可根据典型矿床岩石和原生晕地球化学特征的研究加以确定. 组成矽卡岩的主要蚀变矿物包括石榴石、橄榄石、辉石、阳起石以及绿帘石等均属基性硅酸盐矿物, 富含 Fe, Mn, Mg, Ca 等元素. 此外, 根据对研究区典型矿床的研究显示, 矿石矿物包括磁铁矿、褐铁矿、赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和毒砂. 这些矿石矿物和脉石矿物的大量出现, 必然造成原生晕和次生晕为 Cu, Pb, Zn, W, Mo, As, Sb 等微量元素组合. 因此发生在岩体边缘的基性元素组合 (Fe, Mn, Mg, Ca)、微量元素组合 (Cu, Pb, Zn, W, Mo, As, Sb) 以及高重力、高磁异常组合可以作为蚀变带的预测标志 (图 7). 为了说明消除和压制覆盖层对微量元素异常影响的重要性, 图 8 中给出了微量元素组合异常的分解和识别结果. 首先对多种微量元素进行了对数变换, 在此基础上, 应用主成分分析方法对变换后的数据进行综合, 计算得到不同主成分, 图 8a 给出了第一主成分载荷的计算结果. 载荷图显示了每种微量元素在组成第一主成分的相对重要性或者权重. 相应地, 图 8c 中给出了该主成分的得分结果. 可以看出, 多种元素的线性组合(得分)结果与每个元素的结果类似, 均受到覆盖层的显著影响. 为了消除和压制覆盖层的影响, 文中采用了变化背景和叠加异常的分解技术——多重分形滤波技术 (Spectrum-Area, S-A) (Cheng and Agter-

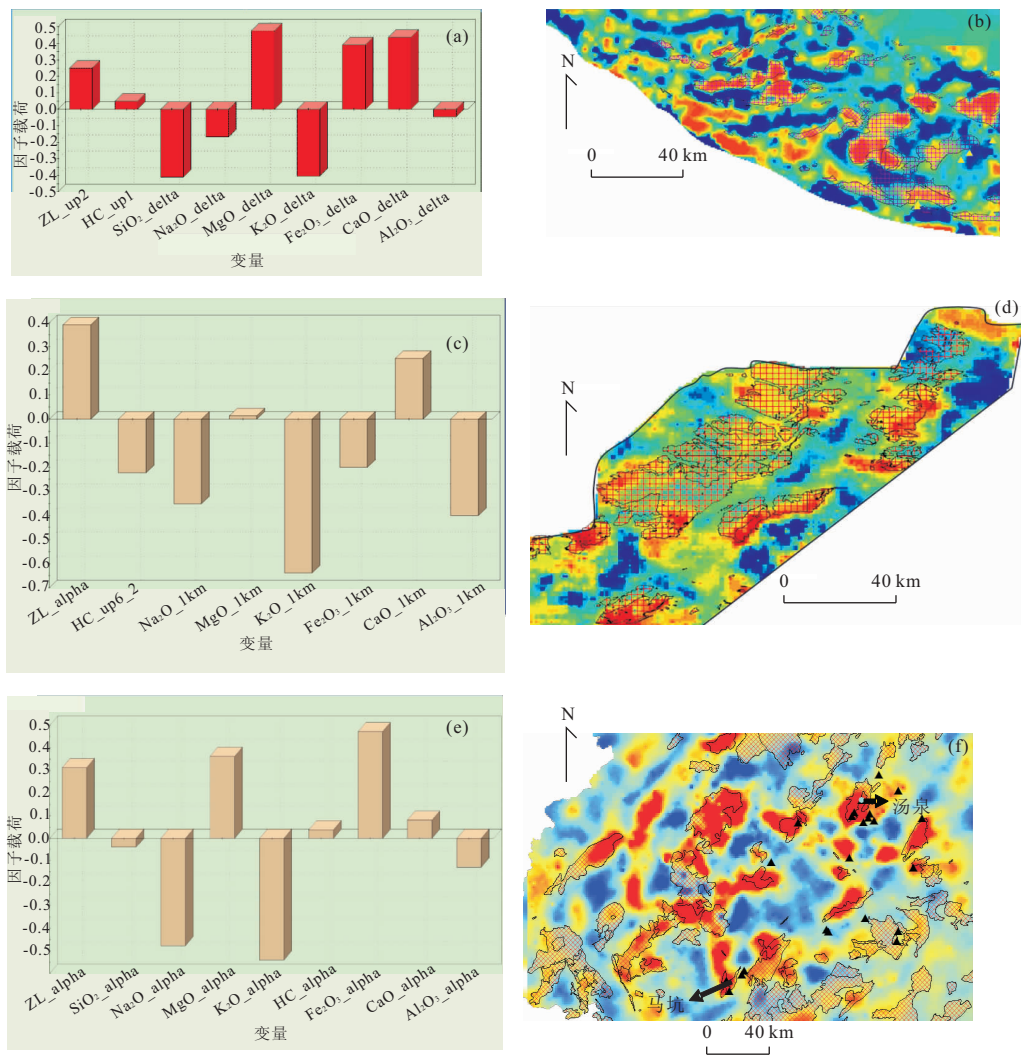


图 6 预测和推断酸性岩浆岩分布

Fig. 6 Prediction of felsic igneous rocks using integrated geophysical and geochemical models obtained by conjunction of weak anomaly extraction techniques and principal component analysis

a, c, d 为地球物理和地球化学融合模型; b, d, e 表示主成分得分。图中的格子图案表示地质图上所显示的已知中酸性岩体, 这些已知的岩体出露范围可以作为对岩体预测模型结果的检验

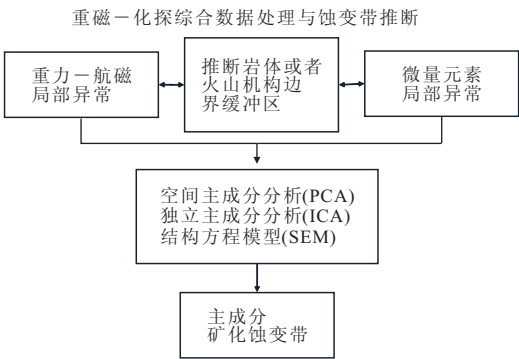


图 7 矿化蚀变带的综合预测模型与方法流程

Fig. 7 Flowchart showing the processes of integrated prediction of mineralization associated alteration zones

berg, 1999). 该方法的基本原理是在频率域中寻找地球化学信号所服从的不同自相似性, 形成分形滤波器, 并对信号进行分解. S-A 方法所分解的异常在空间域显示多样性, 而在频率域中具有自相似性, 这样的自相似性称之为广义自相似性. S-A 方法是建立在广义自相似性原理上研发的异常分解模型. 图 8b 显示, 组合元素得分图(8c)在频率谱与面积(S-A)图式中可以用 2 条直线(分形模型)进行拟合, 2 个模型显示了截然不同的斜率, 说明具有不同的自相似性, 从而可以采用这 2 个模型构建不同的分形滤波器, 并对原始组合元素得分图进行分解, 所分解得到的地球化学组合异常结果见图 8d. 对比图 8c 和 8d 的结果可以看出, 分解后的异常减弱了覆盖层

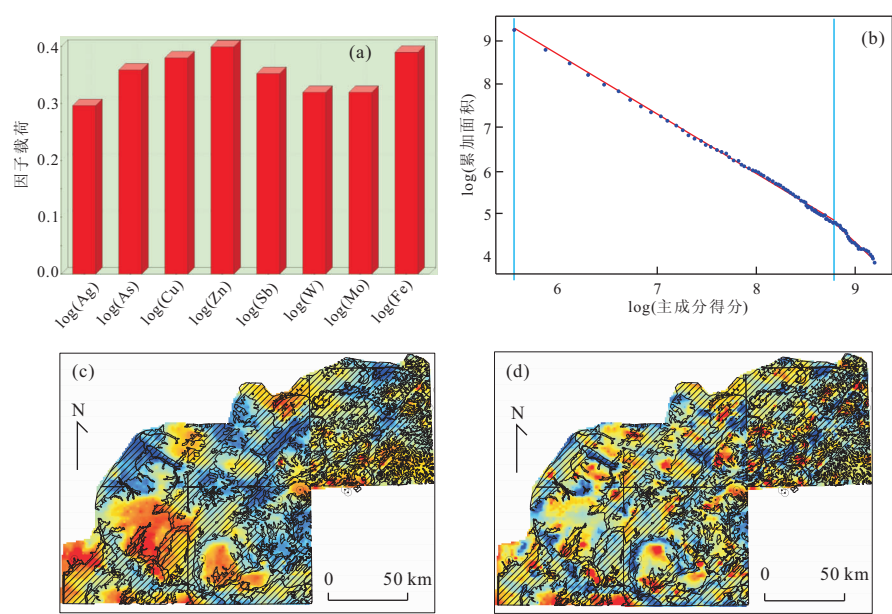


图 8 组合元素地球化学异常的确定

Fig. 8 Geochemical anomalies of combination of trace elements

a. 主成分载荷图; b. 分形滤波 S-A 图式; c. 主成分得分图; d. S-A 方法分解得到的地球化学组合异常图. 空心圆表示矿床分布

的影响,异常与已知矿床的空间分布关系也得到显著改善,说明所分解的局部异常较好地反映了矿化蚀变异常.进一步与推断岩体等信息相融合可以有效圈定矽卡岩和其他热液蚀变带(限于篇幅,这里没有给出详细的融合过程和融合结果).

2.2.3 矿产定量预测模型 对一个区域中某种类型未发现矿床的空间分布位置、矿床个数、资源量等进行预测是矿产定量预测的主要任务和目标.为了实现以上目标,必须采用适当的预测方法.可以选用的方法很多,比如数据驱动、知识驱动和混合驱动方法.预测结果的表达形式也有所差异,比如有利度、后验概率、有利模糊度等形式.计算成矿有利度(含找矿后验概率和模糊度)是定量圈定远景区和对远景区进行分级评价的基础.就整体过程而言,矿产预测过程无疑是一个知识驱动的过程,没有很好的地质、数学、计算机基础是不可能科学合理开展矿产资源预测和评价的,而就预测远景区成矿有利度的计算及预测区的圈定过程而言,又可分为数据驱动、知识驱动和混合驱动 3 类方法(Cheng, 2000).方法的选择也取决于数据水平和工作要求等多个方面因素.数据驱动和知识驱动方法各有其优缺点,许多计算方法既可用作数据驱动也可用作知识驱动或者混合驱动,所以不能简单地将某种方法归为哪种类型,要看这些方法是如何使用的.比如大家所熟悉的特征分析方法,该方法的原型是 20 世纪 70 年代由

Saaty(1980)提出的多指标决策方法(multiple criteria analysis, 简称 MCA)和(analytic hierarchy process, 简称 AHP),该方法在社会学领域应用很广.其核心是采用知识驱动的方法建立对比矩阵,然后根据矩阵的向量长度判断每一向量(变量)的相对重要性.美国地质调查局 McCammon *et al.* (1983)将其作为特征分析方法应用于矿产资源定量评价中,所形成的对比矩阵称为相关矩阵.就该种方法而言,如果所形成的相关矩阵是根据有矿单元形成的,该方法可以作为数据驱动方法,然而如果相关矩阵的形成是根据专家的主观判断而形成,可以将该方法看作知识驱动方法.其他许多方法如模糊证据权方法也具有同样的特点(Cheng and Agterberg, 1999).选择计算方法的一般的原则如下:

(1)如果研究区有足够多的已知矿床用于建立数学模型,则可以采用数据驱动方法或以数据驱动方法为主,比如证据权方法、逻辑回归方法、模糊证据权方法、人工神经网络方法、特征分析方法等.为了对结果进行对比,也可同时采用知识驱动方法(如模糊逻辑方法)和混合型方法(模糊证据权方法).采用证据权方法、逻辑回归方法、模糊证据权方法的要点之一是输出结果以概率形式,同时可以计算结果的不确定性(标准差).因此,可以对结果进行不确定性评价和误差分析;

(2)如果研究区缺乏足够的已知矿床建立数学

模型,虽然有典型矿床作为模型可以建立预测概念模型,但不能有效地建立统计模型,这种情况下可以采用知识驱动为主的方法,如模糊逻辑方法、多指标决策方法等。这几种方法所给出的结果是模糊度或者有利度指数(非概率形式),因此,对计算结果进行不确定性评价和误差分析较困难。

在对东天山地区海相火山岩型铁矿开展预测中,选择了 42 个典型矿床和矿点作为训练集,预测方法采用了证据权方法和模糊证据权方法等数据驱动方法来计算成矿后验概率。而对于大兴安岭地区矽卡岩型铁矿的预测,由于没有足够的典型矿床作为训练集,因此,采用了模糊逻辑方法。以下将简要介绍这两种方法的预测结果。

(1)东天山地区海相火山岩型铁矿预测模型:本文所选择的东天山研究区分布范围大约为 3.37 km^2 ,区内已发现的海相火山岩型铁矿床(点)有 42 处。本研究所采用的数据包括 1:20 万比例尺地质、矿产、水系沉积物地球化学、航磁和 1:50 万比例尺地面重力数据。覆盖全区 8 440 个均匀分布的水系沉积物样品中,每个样品分析了 39 种地球化学元素,包括 7 种氧化物的含量。为了克服覆盖层的影响,对地质数据进行了弱异常提取和信息综合为目的的数据处理和多个模型的建立:①地球化学和地球物理弱异常提取(图 8);②融合水系沉积物地球化学氧化物数据、航磁和重力数据推断和圈定基性火山岩和酸性侵入岩(图 7);③融合微量元素和航磁数据,在侵入岩外接触带一定范围内圈定矽卡岩和热液蚀变带(图 8);④以 42 个矿床和矿点为训练集合,确定了多个证据图层:综合地球化学异常、侵入岩外接触带、基性火山岩机构、有利地层条件等,以这些证据图层为输入建立了模糊证据权模型(图 9a),并以此绘制了铁矿成矿后验概率图(图 10a)。

由于每种证据图层都是在成矿模型和找矿标志的理论分析基础上选定,并经过与 42 个已知矿床(点)的空间优化而确定的,这些证据图层均具有与矿床空间分布的相关性,可为矿床的空间预测提供一定信息,虽然单个证据图层还不能用于准确的矿床预测,但通过叠加证据图层并累计图层提供的综合找矿信息就可达到提高矿床预测精度的目的,这也是应用信息综合或者信息融合模型和技术开展矿产预测的基本原理。

在研究区内,以 6.25 km^2 为统计计算单位,可将研究区划分为 5 400 个统计单元,其中 42 个单元为含矿单元,因此,含矿单元所占比例(先验概率)为

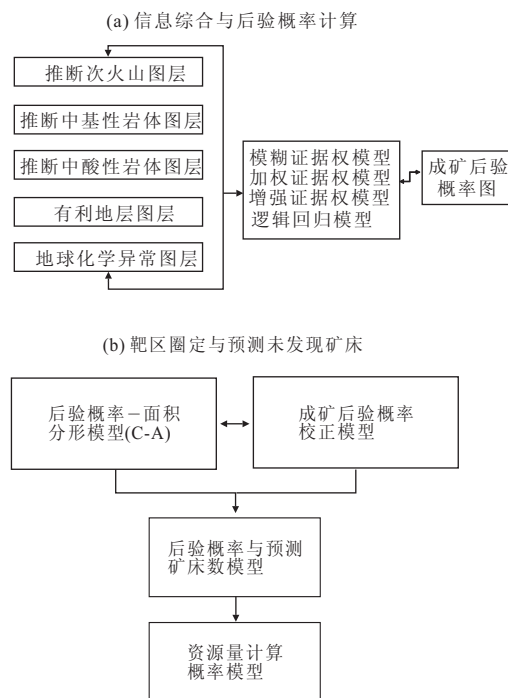


图 9 矿床预测综合模型和远景区圈定方法

Fig. 9 Flowchart showing the processes of integrated model for prediction of mineral deposits

a. 信息综合模型与后验概率计算模型;b. 远景区圈定与资源定量预测模型

0.007 8。采用 4 种证据图层(岩体外接触带,基性火山岩或火山机构,地球化学异常,有利地层)建立了模糊证据权模型,并绘制了模糊后验概率图(图 10a 显示了其中部分计算结果)。考虑到证据图层之间的条件相关性,按照 Cheng(2008a)提出的方法对计算结果进行了校正。

在校正结果基础上,建立了后验概率与面积的分形关系(密度-面积关系)(Cheng, 2012b),根据不同的密度-面积分形关系确定了 3 个概率分布区间 $0 \sim 0.05$, $0.05 \sim 0.17$, $0.17 \sim 1.00$ 。这 3 个概率分布区可以作为 3 种级别的预测远景区,图 10a 中分别用蓝、黄、红 3 种颜色表示。图 10b 分别给出了后验概率与矿床数之间的关系,包括与已发现的矿床数(实际观察的结果)、预测矿床数(概率与面积乘积计算结果)、未发现矿床数(预测矿床数与已发现矿床数之差)的关系图。根据预测未发现矿床结果和已发现的该类矿床的吨位-品位统计模型,可采用蒙特卡罗随机模拟方法估算未发现矿床的资源总量(图 9b)。这种情况下,3 个参数(未发现矿床数、矿床吨位、品位)均为随机变量,因此得到的估算资源量

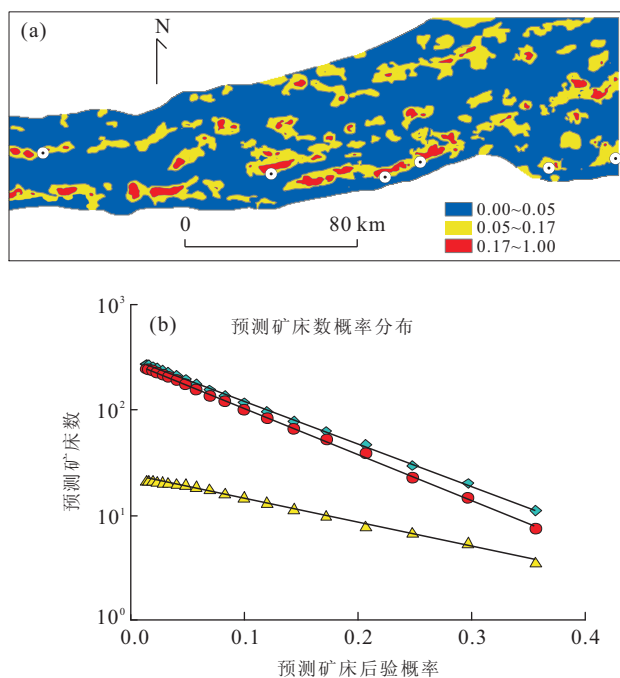


图 10 东天山某区域铁矿预测后验概率结果

Fig. 10 Results of posterior probability for iron mineral deposits in Dongtianshan district

a. 后验概率图; b. 预测矿床数概率模型

也是随机变量(成秋明, 1989). 结果表明, 该研究区内所圈定的 A 级远景区中有将近 30% 位于覆盖区, 与覆盖区所占整个研究区的面积比例相当. 对预测远景区含矿性的野外查证和工程验证还在进行中, 进一步的结果将在后续的论文中进行介绍.

(2) 内蒙大兴安岭沙麦一朝不愣地区矽卡岩型铁矿预测模型: 内蒙大兴安岭南部沙麦一朝不愣研究区面积约为 3.2 万 km^2 . 近年来区内发现了一系列重要矿床, 其中朝不愣矽卡岩型铁多金属矿床为本次选定的主要预测矿床类型(刘建明等, 2004; 金岩等, 2005; 邵积东等, 2009). 前面已经谈到, 研究区的大部分范围(超过 70%)被厚达 200 m 的第三、第四系松散沉积物所覆盖. 覆盖层对水系沉积物地球化学异常具有明显的影响(图 2a). 朝不愣矽卡岩型铁多金属矿床(图 4b)矿区出露的赋矿地层为中泥盆系砂岩、凝灰岩、板岩夹灰岩、粉砂岩(聂秀兰和侯万荣, 2010). 矿区侵入岩以东北向展布的侏罗纪黑云母花岗岩为主. 侵入岩在朝不愣矿床成矿作用中发挥了重要作用, 矿床分布与侵入岩具有密切的关系(金岩等, 2005; 聂凤军等, 2007; 许立权等, 2010). 在侏罗纪黑云母花岗岩与泥盆系地层外接触带形成了矽卡岩, 其内赋存矽卡岩型铁多金属矿床. 矿体多产在顺地层层理或层间裂隙的矽卡岩或者在花岗岩

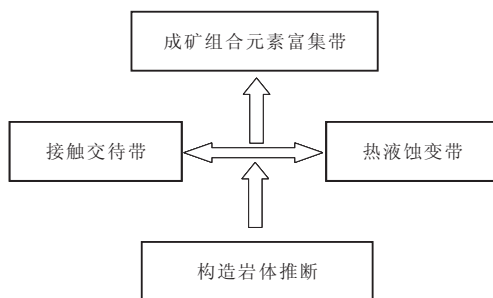


图 11 朝不愣矽卡岩型铁矿预测模型

Fig. 11 Flowchart showing the processes of integrated prediction of skarn iron mineral deposits

体与大理岩接触带上的矽卡岩体内. 金属矿物主要为磁铁矿和闪锌矿, 脉石矿物主要有钙铁柘榴子石和透辉石, 次为黑云母、绿泥石、绿帘石等其他矽卡岩矿物. 矿体的重要寻找标志是磁异常. 由于区内没有足够多的典型矿床可用于建立统计模型, 对该类矿床的预测采用了模糊逻辑的信息叠加方法. 其基本预测思路和流程见图 11.

本研究所用的数据包括 1:20 万比例尺地质、矿产、水系沉积物地球化学、航磁和地面重力数据. 为了克服覆盖层的影响, 对地质数据进行了弱异常提取和信息综合为目的的数据处理和多个模型的建立: ①地球化学和地球物理弱异常提取(图 8); ②融合水系沉积物地球化学氧化物数据、航磁和重力数据推断和圈定研究区包括沙漠覆盖区内的酸性侵入岩(图 6d); ③融合微量元素和航磁数据, 在侵入岩分布的一定范围内圈定矽卡岩和热液蚀变带; ④将局部奇异性分析方法和主成分分析方法相结合圈定了局部异常集中区; ⑤在此基础上, 采用模糊逻辑“相交”运算对推断岩体接触带、推断矽卡岩蚀变带、局部异常带进行了融合, 形成了综合异常图(图 12). 由于使用了模糊逻辑“相交”运算, 图 12 中高综合异常区表示该区域具备图 11 模型中所有 3 种推断条件, 因此成为有利成矿地段, 而低综合异常区域至少有图 11 中涉及的某种或者多种条件的缺失, 为不利成矿地段. 因此, 图 11 和 12 的结果反映了地质、地球物理、地球化学综合异常, 与已知矿床的空间分布也显示, 高综合异常区是与侵入岩有关的接触交待(矽卡岩)型和热液型矿床的有利地段. 同时要注意, 图 12 中所圈定的综合异常中, 有相当一部分异常分布在覆盖层中, 说明采用本文介绍的综合预测方法能够在覆盖区中圈定综合异常并圈定成矿远景区. 由于篇幅所限, 文中未给出更详细的预测过程, 这些内容将在后续论文中介绍.

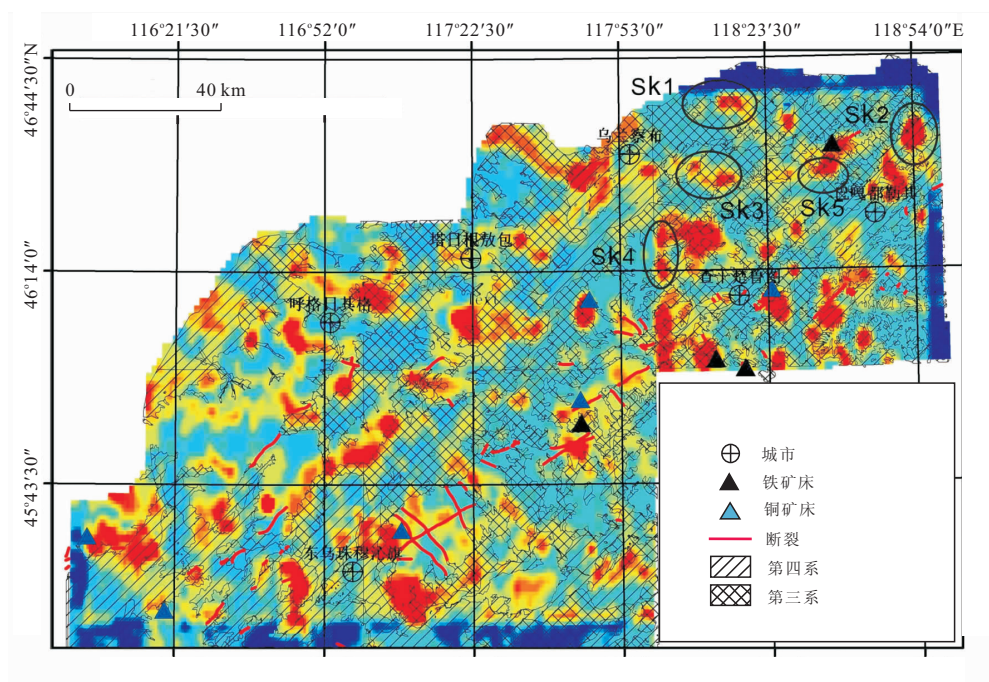


图 12 综合异常圈定结果(输入变量为推断岩体外接触带,推断矽卡岩蚀变带,局部地球化学异常,采用信息综合模型为模糊逻辑“相交”运算方法)

Fig. 12 Integrated geo-anomalies obtained by combining inferred outer contacts of intrusions, skarn alteration zones and local geochemical anomalies by fuzzy logic model with intersect mode

3 结论

在覆盖区开展矿产预测常常会面临诸多找矿信息获取难题,比如弱信息的提取、复合一叠加信息的分解、缺失和不完整信息的综合等困难.由于覆盖层对下伏矿床地球化学元素的屏蔽和衰减作用,地表介质中的地球化学信息是弱缓的,必须选取合适的取样介质和分析手段进行地球化学探测,同时必须采用合理的数学模型和信息技术进行数据处理和异常分析与解释.由于多种地质过程包括覆盖层相关地表过程的影响,地表地球化学异常往往是复合一叠加异常,必须进行适当分解才能获得具有明确地质意义的地球化学分量.覆盖区信息的缺失和不完整也是普遍的,如何利用缺失和不完整的信息也是矿产预测的一大难题.文中以矽卡岩型铁多金属矿为例说明了基于多重分形奇异性理论所发展的非线性矿产预测理论和方法为以上 3 个难题的解决提供了可能的途径:局部奇异性分析方法可以压制背景影响突出深源异常,对覆盖区弱信息提取具有独到之处;根据广义自相似性原理研发的多重分形滤波技术能够合理分解复合一叠加信息,减少覆盖层对

地球化学异常识别的影响;以证据权模型为代表的
数据驱动模型和以模糊逻辑为代表的知识驱动模型
具有处理缺失和不完整信息的功能,能够通过融合
直接和间接找矿信息以提高矿产预测精度.建议在
更多地区选择更多矿床预测类型开展进一步应用和
方法验证.

致谢:该论文是覆盖区矿产综合预测计划项目
研究成果的一部分,是全体参与项目实施科研人员
的工作结晶.数据收集和典型矿床调研得到了新疆
地矿局、内蒙古地质调查研究院、福建地质调查研
究院的鼎力支持.数据整理、处理、分析得到了夏庆霖
教授、张生元教授、陈志军副教授、左仁广副教授、姚
凌青博士等的帮助,博士张道军对部分图件进行了
绘制,在此一并表示感谢!

References

Agterberg, F. P. , 1989. Computer programs for mineral ex-
ploration. *Science*, 245(4913): 76—81. doi: 10. 1126/
science. 245. 4913. 76

Bonham-Carter, G. F. , 1994. Geographic information system
for geosciences: modelling with GIS. Pergamon Press,
Oxford.

Anand, R. R. , Robertson, I. D. M. , 2012. The role of mineralogy

- and geochemistry in forming anomalies on interfaces and in areas of deep basin cover; implications for exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 12(1): 45—66. doi: 10.1144/1467-7873/10-RA-067
- Cameron, E. M., Hamilton, S. M., Leybourne, M. I., et al., 2004. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4(1): 7—32. doi: 10.1144/1467-7873/03-019
- Cameron, E. M., Leybourne, M. I., Kelley, D. L., 2002. Exploring for deeply covered mineral deposits: formation of geochemical anomalies in northern Chile by earthquake-induced surface flooding of mineralized groundwaters. *Geology*, 30(11): 1007—1010. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<1007:EFDCMD>2.0.CO;2
- Cameron, E. M., Leybourne, M. I., Palacios, C., 2008. Economic geology models 1. geochemical exploration and metallogenic studies, northern Chile. *Geoscience Canada*, 35(3—4): 1—12.
- Carrigan, C. R., Heinle, R. A., Hudson, G. B., 1996. Trace gas emissions on geological faults as indicators of underground nuclear testing. *Nature*, 382: 528—531. doi: 10.1038/382528a0
- Chen, Y. L., 1999. Geochemistry of granitoids from the eastern Tianshan Mountains and northern Qinling Belt. Geological Publish House, Beijing (in Chinese).
- Chen, Y. C., Wang, D. H., 2010. Prediction classification of major mineral deposits types. Geological Publish House, Beijing (in Chinese).
- Cheng, Q. M., 1989. A method for estimation of resources from multiple populations. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 19(5): 50—56 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., Agterberg F. P., 1999. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 8(1): 27—35. doi: 10.1023/A:1021677510649
- Cheng, Q. M., 1999. Multifractality and spatial statistics. *Computers & Geosciences*, 25(9): 949—961. doi: 10.1016/S0098-3004(99)00060-6
- Cheng, Q. M., 2000. Geodata analysis system (GeoDAS) for mineral exploration: unpublished user's guide and exercise manual. Material for the training workshop on GeoDAS, Toronto, 204.
- Cheng, Q. M., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 32(1—2): 314—324. doi: 10.1016/j.oregeorev.2006.10.002
- Cheng, Q. M., 2008a. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments. *Mathematical Geosciences*, 40(5): 503—532. doi: 10.1007/s11004-008-9172-6
- Cheng, Q. M., 2008b. A combined power-law and exponential model for streamflow recessions. *Journal of Hydrology*, 352(1—2): 157—167. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.01.017
- Cheng, Q. M., 2008c. Singularity of mineralization and multifractal distribution of mineral deposits. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 298—305 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2011. Singularity modeling of geo-anomalies and recognition of anomalies caused by buried sources. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(2): 307—316 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2012a. Singularity theory and methods for mapping geochemical anomalies caused by buried sources and for predicting undiscovered mineral deposits in covered areas. *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 55—70. doi: 10.1016/j.gexplo.2012.07.007
- Cheng, Q. M., 2012b. Multiplicative cascade processes and information integration for predictive mapping. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 19: 57—68. doi: 10.5194/npg-19-57-2012
- Cheng, Q. M., 2012c. Vertical distribution of elements in regoliths over mineral deposits and implication on mapping geochemical weak anomalies caused by buried sources in covered areas. *Geochemistry: Environment, Exploration and Analysis* (in press).
- Cheng, Q. M., Xu, Y., Grunsky, E., 2000. Integrated spatial and spectral analysis for geochemical anomaly separation. In: Lippard, S. J., Naess, A., Sinding-Larsen, R. eds., Proceedings of the fifth annual conference of the international association for mathematical geology. *Natural Resources Research*, 9(1): 43—52. doi: 10.1023/A:1010109829861
- Cheng, Q. M., Liu, J. T., Zhang, S. Y., et al., 2009. Application of GIS-Model builder technology for national mineral resource assessment. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 338—346 (in Chinese with English abstract).
- Cohen, D. R., Kelley, D. L., Anand, R., 2010. Major advances in exploration geochemistry, 1998—2007. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(1): 3—16. doi: 10.1144/1467-7873/09-215
- Deng, S. T., Guo, Z. J., Zhang, Z. C., 2006. Metallogenic age

- and significance of contact metasomatic type iron deposits in the eastern Tianshan. *Geology and Prospecting*, 42(6): 17–20 (in Chinese with English abstract).
- Dunn, C. E., 2007. Biogeochemistry in mineral exploration; handbook of exploration and environmental geochemistry 9, Elsevier, Amsterdam. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10: 17–26.
- Einaudi, M. T., Burt, D. M., 1982. Introduction—terminology, classification and composition of skarn deposits. *Economic Geology*, 77(4): 745–754. doi: 10. 2113/ gsecongeo. 77. 4. 745
- Goldberg, I. S., 1998. Vertical migration of elements from mineral deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 61(1–3): 191–202. doi: 10. 106/S0375–6742(97) 00045–9
- Govett, G. J. S., 1973. Differential secondary dispersion in transported soils and post-mineralization rocks: an electrochemical interpretation. In: Jones, M. J., ed., *Geochemical exploration*. Institution of Mining and Metallurgy, London, 81–91.
- Govett, G. J. S., 1976. Detection of deeply buried and blind sulphide deposits by measurement of H^+ and conductivity of closely shaped surface soil samples. *Journal of Geochemical Exploration*, 6(1–2): 359–382. doi: 10. 1016/0376–6742(76)90024–8
- Jin, Y., Liu, Y. T., Xie, Y. L., 2005. Relationship between magmatism and polymetal mineralization in Dongwuqi area, Inner Mongolia. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 8–12 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. Q., Tang, Y. L., Zhou, R. H., 1996. Metallogenic series types of ore deposits in Xinjiang. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, J. M., Zhang, R., Zhang, Q. Z., 2004. Characteristics of regional mineralization in Daxinanling, Inner Mongolia, China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 270–277 (in Chinese with English abstract).
- Ma, R. S., Shu, L. S., Sun, J. Q., 1997. The tectonic deformation, evolution and metallization in the eastern Tianshan Belt, northwest China. Geological Publish House, Beijing, 202 (in Chinese).
- Mann, A. W., 2010. Strong versus weak digestions: ligand-based soil extraction geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(1): 17–26. doi: 10. 1144/1467–7873/09–216
- Mann, A. W., Birrel, R. D., Fedikow, M. A. F., et al., 2005. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5(3): 201–210. doi: 10. 1144/1467–7873/03–045
- McCammon, R. B., Botbol, J. M., Sinding-Larsen, R., et al., 1983. Characteristic analysis—1981: final program and a possible discovery. *Mathematical Geology*, 15(1): 59–83. doi: 10. 1007/BF01030076
- Moon, C. J., 1999. Towards a quantitative model of downstream dilution of point source. *Journal of Geochemical Exploration*, 65(2): 111–132. doi: 10. 106/S0375–6742(98) 00065–X
- Nie, F. J., Zhang, W. Y., Du, A. D., et al., 2007. Re-Os isotopic age dating of molybdenite separates from the Chaobulengskarn iron-polymetallic deposit, Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia. *ACTA Geoscientifica Sinica*, 28(4): 315–323 (in Chinese with English abstract).
- Nie, X. L., Hou, W. R., 2010. The discovery of the Diyanqinamu large-size Mo-Ag deposit, Inner Mongolia, and its geological significance. *ACTA Geoscientifica Sinica*, 31(3): 469–472 (in Chinese with English abstract).
- Saaty, T. L., 1980. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Shao, J. D., Tao, J. X., Li, S. W., et al., 2009. The new progress in ore prospecting within Daxing'anling mineralization belt, China. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 955–962 (in Chinese with English abstract).
- Singer, D. A., 1993. Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources. *Natural Resources Research*, 2(2): 69–81. doi: 10. 1007/BF02272804
- Smee, B. W., 1998. A new theory to explain the formation of soil geochemical responses over deeply covered gold mineralization in arid environments. *Journal of Geochemical Exploration*, 61(1–3): 149–172. doi: 10. 1016/S0375–6742(98)00007–7
- Smee, B. W., 1983. Laboratory and field evidence in support of the electrochemically-enhanced migration of ions through glaciolacustrine sediment. *Journal of Geochemical Exploration*, 19(1–3): 277–304. doi: 10. 1016/0375–6742(83)90022–5
- Wang, C. Y., Ma, R. S., 1994. Study on the regional metamorphism and the tectonic settings in the eastern Tianshan orogenic belt. *Journal of Nanjing University (Natural Science Edition)*, 30(3): 494–503 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Li, C. J., Chen, Z. H., et al., 2006. Metallogenic characteristics and direction in mineral search in

- the East Tianshan, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 910—915 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Q., Zhang, B. M., Liu, X. M., 2012. Nanogeochemistry: deep-penetrating geochemical exploration through cover. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 101—112.
- Wang, X. Q., Wen, X. Q., Rong, Y., 2007. Vertical variations and dispersion of elements in arid desert regolith: a case study from the Jinwozi gold deposit, northwestern China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 7(2): 163—171. doi: 10.1144/1467-7873/07-131
- Xu, L. Q., Chen, Z. Y., Chen, Z. H., et al., 2010. SHRIMP dating of medium-coarse-granite in Chaobuleng iron deposit, Dong Ujimqin, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 29(2): 317—322 (in Chinese with English abstract).
- Ye, R., Zhang, B. M., Yao, W. S., 2012. Occurrences and formation of copper nanoparticles over the concealed ore deposits. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 120—129 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. M., Chi, Q. H., Zhang, Y. S., 2012. Three-dimensional geochemical distribution patterns in regolith over a concealed gold deposits in arid desert terrains. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 130—137 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J., Wang, W. L., Dong, L. H., et al., 2012. Application of geochemical anomaly identification methods in mapping of intermediate and felsic igneous rocks in eastern Tianshan, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 81—89. doi:10.1016/j.gexplo.2012.08.006
- Zhao, P. D., 2007. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. M., Tan, H. J., Xu, Z. L., et al., 1983. The calcic-skarn iron ore deposits of Makeng type in Southwestern Fujian. *Journal of Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences*, (Special Issue 1): 1—141.
- 成秋明, 1989. 多母体资源总量模拟方法. 长春地质学院学报, 19(5): 50—56.
- 成秋明, 2008c. 成矿过程奇异性与矿床多重分形分布. 矿物岩石地球化学通报, 27(3): 298—305.
- 成秋明, 2011. 地质异常的奇异性度量与隐伏源致矿异常识别. 地球科学, 36(2): 307—316.
- 成秋明, 刘江涛, 张生元, 等, 2009. GIS 中的空间建模器技术及其在全国矿产资源潜力预测中的应用. 地球科学, 34(2): 338—346.
- 邓松涛, 郭召杰, 张志诚, 2006. 东天山接触交代型铁矿成矿时代的确定及其意义. 地质与勘探, 42(6): 17—20.
- 金岩, 刘玉堂, 谢玉玲, 2005. 内蒙古东乌旗地区岩浆活动与多金属成矿的关系. 华南地质与矿产, (1): 8—12.
- 刘德权, 唐延龄, 周汝洪, 1996. 中国新疆矿床成矿系列. 北京: 地质出版社.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲, 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征. 地质前缘, 11(1): 270—277.
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐, 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京: 地质出版社, 1—201.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 等, 2007. 内蒙古朝不楞砂卡岩型铁多金属矿床辉钼矿铼—钨同位素年龄及地质意义. 地球学报, 28(4): 315—323.
- 聂秀兰, 侯万荣, 2010. 内蒙古迪彦钦阿木大型钼—银矿床的发现及地质意义. 地球学报, 31(3): 469—472.
- 邵积东, 陶继雄, 李四娃, 等, 2009. 大兴安岭成矿带找矿工作新进展. 地质通报, 28(7): 955—962.
- 王赐银, 马瑞士, 1994. 东天山造山带区域变质作用及其构造环境研究. 南京大学学报(自然科学版), 30(3): 494—503.
- 王登红, 李纯杰, 陈郑辉, 等, 2006. 东天山成矿规律与找矿方向的初步研究. 地质通报, 25(8): 910—915.
- 王学求, 张必敏, 刘学敏, 2012. 纳米地球化学: 穿透覆盖层的地球化学勘查. 地质前缘, 19(3): 101—112.
- 许立权, 陈志勇, 陈郑辉, 等, 2010. 内蒙古东乌旗朝不楞铁矿区中粗粒花岗岩 SHRIMP 年令及其意义. 矿床地质, 29(2): 317—322.
- 叶荣, 张必敏, 姚文生, 等, 2012. 隐伏矿床上方纳米铜颗粒存在形式与成因. 地质前缘, 19(3): 120—129.
- 张必敏, 迟清华, 张永勤, 2012. 干旱荒漠覆盖区隐伏金矿上方覆盖层三维地球化学分布模式. 地质前缘, 19(3): 130—137.
- 赵鹏大, 2007. 成矿定量预测与深部找矿. 地质前缘, 14(5): 1—10.
- 赵一鸣, 毕承思, 谭惠静, 等, 1983. 闽西南地区马坑式钙砂卡岩型铁矿床. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊. (专辑 1): 1—141.

附中文参考文献

- 陈岳龙, 1999. 东天山、北秦岭花岗岩类地球化学. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 王登红, 2010. 重要矿产预测类型划分方案. 北京: 地质出版社.
- 成秋明, 1989. 多母体资源总量模拟方法. 长春地质学院学